

# Medição Simultânea de Velocidade e Concentração em Meios Líquidos

M.M.C.L. Lima<sup>1</sup>

*Escola de Engenharia da Universidade do Minho  
4800-058 Guimarães, Portugal*

J.M.L.M. Palma<sup>2</sup>

*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
4200-465 Porto, Portugal*

## RESUMO

Este artigo descreve os procedimentos experimentais para medição simultânea de velocidade e concentração, utilizando Anemometria Laser *Doppler* e Fluorescência Induzida por Laser. Apesar da fluorescência induzida por laser ser uma técnica usual no âmbito da química analítica, a sua aplicação em Mecânica dos Fluidos não é comum. Efectuaram-se ensaios de maneira a caracterizar o comportamento experimental das soluções aquosas do traçador fluorescente (rodamina B) e desenvolveu-se um método experimental em que a Fluorescência Induzida por Laser podia ser utilizada juntamente com a Anemometria Laser *Doppler*.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo simultâneo do campo de velocidade e concentração de um escoamento é essencial para a interpretação dos fenómenos em muitos sistemas de Mecânica dos Fluidos, e constitui um elemento valioso no desenvolvimento e verificação de métodos de simulação em computador. A vantagem principal da medição simultânea de velocidade e concentração é permitir o conhecimento mais profundo da mistura turbulenta, de interesse para diversas áreas de engenharia em que os fenómenos de mistura são importantes. Enumeram-se a título de exemplo, na área da engenharia civil e de ambiente os estudos de dispersão ou poluição (oceânica, estuarina ou fluvial) e de transporte de sedimentos (e.g., List (1996)); nas áreas da indústria automóvel e da engenharia mecânica os fenómenos de combustão, e na área da engenharia química o estudo de processos químicos de reacção.

Este artigo pretende mostrar que a Fluorescência Induzida por Laser (LIF, *Laser Induced Fluorescence*) pode ser utilizada como uma extensão dos sistemas de medição de velocidade por Anemometria Laser *Doppler* (LDA, *Laser Doppler Anemometry*), possibilitando desta forma a medição simultânea de velocidade e concentração em escoamentos de fluidos incompressíveis.

---

<sup>1</sup> Professor Auxiliar

<sup>2</sup> Professor Associado

A Fluorescência Induzida por Laser é uma técnica óptica que não interfere com o escoamento, e que pode ser utilizada de duas formas diferentes. Numa abordagem qualitativa, para visualização e identificação de estruturas turbulentas dos escoamentos, ou numa abordagem quantitativa, como a descrita neste artigo, para medir a concentração de um traçador fluorescente num meio aquoso. O traçador é passivo, i.e. não influencia o escoamento, simulando assim o transporte de calor ou de um determinado poluente, naqueles casos em que não há alteração das propriedades do fluido, causadas por qualquer um destes agentes. Uma abordagem fundamental da LIF como técnica de estudo do transporte escalar turbulento pode ser encontrada em Walker (1987), e as primeiras medições simultâneas com LIF e LDA são usualmente atribuídas a Owen (1976). A LIF foi associada à LDA, técnica usual na medição de velocidade em laboratório (Durst, 1981).

O artigo está organizado em 5 secções, incluindo esta secção inicial introdutória. Na secção 2 apresenta-se a técnica de fluorescência induzida por laser, sendo o método experimental utilizado descrito na secção 3. Na secção 4 analisam-se os resultados, terminando o artigo com o resumo das conclusões do trabalho na secção 5.

## 2. TÉCNICA DE FLUORESCÊNCIA INDUZIDA POR LASER

### 2.1 Fluorescência

A fluorescência, um dos fenómenos da luminescência, consiste num processo molecular de transição entre diferentes estados electrónicos (Lakowicz, 1983). A molécula, com níveis energéticos muito próximos, pode passar de um nível de energia inferior para um nível superior, desde que absorva uma energia igual à diferença energética entre os dois níveis de energia (figura 1).

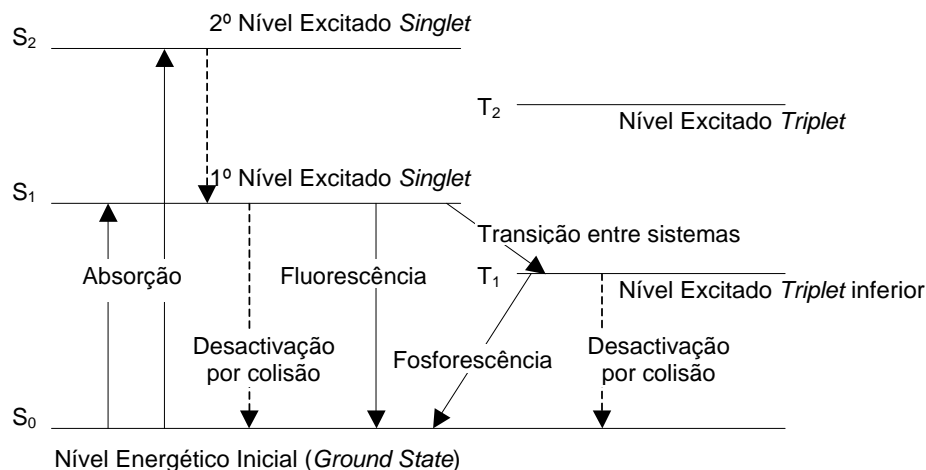


Fig. 1. Diagrama de Jablonski. Representação esquemática dos níveis de energia para uma molécula diatómica. Em Guibault (1990)

Os estados electrónicos de uma molécula dividem-se em estados *singlet* ( $S_0$ ,  $S_1$  e  $S_2$ , na figura 1) e *triplet* ( $T_1$  e  $T_2$ , na figura 1). Uma das formas de fornecer energia a uma molécula é excitá-la através de luz. O electrão do seu nível energético inicial (*ground state*,  $S_0$ ) salta para um estado de energia superior (*singlet state*,  $S_1$  ou  $S_2$ ), e ao regressar a  $S_0$  emite energia de um comprimento de onda superior. A diferença entre o comprimento de onda da luz absorvida e emitida deve-se ao facto de a molécula excitada ter reduzido a sua energia passando de níveis excitados *singlet* superiores ( $S_2$ ) ao primeiro nível excitado *singlet*  $S_1$ ,

antes de regressar ao nível energético inicial ( $S_0$ ). A fluorescência é o retorno de um electrão para o nível energético inicial, acompanhado de emissão de luz. As transições entre estados de energia *singlet* são permitidas pela mecânica quântica e apresentam taxas de emissão da ordem dos  $10^8 \text{ s}^{-1}$ . Isto origina um tempo de vida de fluorescência, i.e. a duração média do intervalo de tempo que a molécula permanece num nível excitado, da ordem dos 10 ns. Estes tempos de fluorescência são adequados a aplicações em mecânica dos fluidos por serem inferiores aos tempos de resposta dos fenómenos físicos envolvidos. A fosforescência e fluorescência atrasada são outros dois fenómenos da fotoluminescência, mas que não são de interesse no âmbito deste trabalho.

## 2.2 Equação fundamental

A equação fundamental a ser utilizada em medições através de LIF é (Guilbault, 1990),

$$I_f = 2.3\phi I_0 \epsilon bc \quad (1)$$

sendo  $\phi$  a eficiência quântica, definida como a razão entre as energias emitida e absorvida,  $I_0$  a intensidade de luz incidente,  $\epsilon$  a absorvidade molar e  $b$  a extensão do percurso óptico. Uma relação linear entre a intensidade de luz fluorescente e a concentração pode ser encontrada para baixas concentrações do traçador fluorescente, caso em que a absorção dos raios laser ao longo do percurso óptico é desprezável.

## 2.3 A fluorescência como ferramenta analítica

A emissão molecular fluorescente apresenta vantagens como ferramenta analítica quando comparada com outros métodos de espectroscopia (Guilbault, 1990), pois possui elevada sensibilidade, a gama linear de análise é maior e o erro inerente à medição é praticamente constante ao longo de toda a gama de resposta. No entanto, a principal desvantagem da fluorescência resulta da sua dependência de factores ambientais. A fluorescência pode ser reduzida (*quenching*) através dum processo de desactivação, resultante da interacção entre o composto fluorescente e outra substância presente no sistema, por luz ultravioleta, por efeito de temperatura, oxigénio e impurezas existentes na solução. É desejável a utilização de um sinal de fluorescência de intensidade elevada, o que pode ser obtido com concentrações elevadas ou utilizando uma radiação incidente elevada. Qualquer um destes parâmetros pode, no entanto, ter o efeito contrário. Um fenómeno fluorescente só é possível se existir absorção, mas se esta for excessiva, a porção da solução mais perto da fonte absorve tanta radiação que cada vez menos radiação fica disponível para excitar as moléculas fluorescentes na posição de medida. Isto origina uma diminuição da fluorescência (efeito *inner cell*) ou de absorção ao longo do percurso óptico (Guilbault, 1990). Além disso, para concentrações elevadas pode ocorrer a formação de compostos constituídos por várias moléculas fluorescentes, o que origina a diminuição da eficiência quântica e a alteração dos espectros de absorção e emissão, resultando numa diminuição da intensidade de fluorescência emitida (Wild, 1987).

Pode ainda referir-se um fenómeno de saturação, que ocorre quando se combina radiação incidente elevada com soluções que não são agitadas, verificando-se a diminuição da intensidade de fluorescência emitida com o aumento da intensidade de radiação incidente (Walker, 1987). A substância fluorescente decomposta não absorve radiação e em estudos de mistura é simplesmente diluída sem emitir fluorescência. Este problema é ultrapassado se o tempo de residência da solução no volume de controlo for pequeno em relação à constante temporal de fotodecomposição (20s para a rodamina 6G, ver Koochesfahani (1984)), i.e. se se utilizarem as soluções em escoamentos ou permanentemente agitadas, e se se usarem volumes

de solução muito superiores aos do volume de controlo (Koochesfahani, 1984). A expansão termal (*thermal blooming*) pode igualmente afectar as medições de fluorescência e é causada pelo aquecimento localizado da solução pelo raio laser (Koochesfahani, 1984). Isto provoca gradientes do índice de refacção que actuam como uma lente, originando a rápida divergência do raio e uma acentuada diminuição da intensidade de fluorescência. Este problema é aliviado pelo agitar da solução ou escoamento associado à experiência, que originam uma remoção rápida do calor do percurso do raio.

Em resumo, são conhecidos um conjunto de fenómenos físicos e químicos que alertam para as dificuldades de aplicação da LIF em Mecânica dos Fluidos e para a necessidade de proceder à caracterização das condições experimentais. Uma descrição mais exaustiva destes fenómenos e identificação dos trabalhos publicados mais relevantes está disponível em Lima (2000).

### 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Nesta secção são descritos o equipamento experimental para a medição simultânea por LDA e LIF (subsecção 3.1), a instalação experimental utilizada (subsecção 3.2) e o traçador fluorescente utilizado (subsecção 3.3).

#### 3.1 Equipamento de Medida

A fonte de luz (figura 2) era um laser de Argon-ion (Spectra-Physics, modelo Stabillite 2017), a operar no modo de potência com um comprimento de onda de 514.5 nm. O sistema óptico consistiu num sistema convencional de LDA de uma componente (Dantec, modelo 55×22 Modular Optics) na configuração de retro-dispersão (*backscatter*), com uma célula de Bragg de  $\pm 40$  MHz (Frequency Shifter, Dantec 55N11) e uma lente frontal acromática de comprimento focal igual a 310 mm. O volume de controlo de dimensão 0.075×0.075×0.73 mm, era movimentado no interior da secção de teste, movimentando o laser e elementos ópticos montados numa mesa de atravessamento.

Um separador de cor dividia a luz recolhida em dois comprimentos de onda, superior e inferior a 590 nm, que eram filtrados antes de chegarem aos fotomultiplicadores (Dantec, modelo 57×08) para o sinal de velocidade (filtro de interferência de 514.5 nm, Dantec 55×37) e para o sinal de concentração (filtro de banda passa alto de 570 nm, Melles Griot OG570). Os fotomultiplicadores foram alimentados por duas fontes de alimentação separadas (Dantec, modelo 55L97), em que no caso da medição de fluorescência a fonte de alimentação convencional foi alterada e propositadamente concebida para a presente aplicação, com cuidados especiais para evitar interferências e reduzir o ruído electrónico para níveis abaixo da intensidade do sinal de concentração (Lima, 2000). Esta configuração óptica garantia que o sinal de velocidade e o sinal de concentração eram originários exactamente da mesma posição do escoamento, e para além disso facilitava a focagem do sinal de concentração.

A aquisição de dados foi efectuada recorrendo a um contador TSI (1990C) e a uma placa de velocimetria Zechs Electronics 1400A, conjuntamente com um módulo de conversão de sinal analógico em digital (ADCM Daughter Board, Analog/Digital Converter Module), instalados num computador (Dell, modelo 325 Sx). O módulo de conversão de sinal analógico em digital, com 12 bits de resolução, destinava-se à medição da voltagem proveniente da fonte de alimentação do sinal de fluorescência e constituía uma extensão da placa de aquisição de anemometria laser. Os sinais de velocidade e concentração eram adquiridos simultaneamente, sempre que o contador validava sinal de velocidade.

Para garantir a compatibilidade entre a voltagem do sinal de fluorescência e a gama de voltagens do módulo de conversão de sinal analógico em digital, utilizou-se uma pré-amplificação do fotomultiplicador do sinal de fluorescência elevada (-1500 V) e a amplificação máxima do sinal de saída do fotomultiplicador na fonte de alimentação (8×). A tensão de pré-amplificação elevada permitia reduzir a intensidade do ruído electrónico (Lima, 2000), e em conjunto com a amplificação máxima na fonte de alimentação aumentar a relação sinal/ruído. Como resultado, optou-se por utilizar a placa para voltagens do sinal de fluorescência entre 0 e 5 V, correspondente a uma resolução de 1.22 mV.

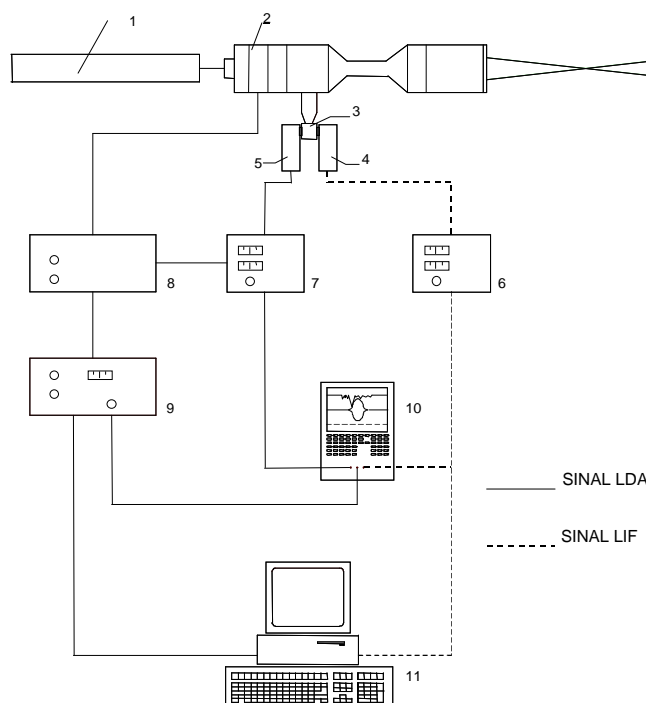


Fig. 2. Equipamento de medição simultânea por LDA e LIF (1: Laser; 2: Sistema óptico; 3: Separador de cor com filtros; 4: Fotomultiplicador para LIF ( $\lambda > 590$  nm); 5: Fotomultiplicador para LDA ( $\lambda < 590$  nm); 6: Fonte de alimentação do fotomultiplicador de LIF; 7: Fonte de alimentação do fotomultiplicador de LDA; 8: Frequency shifter; 9: Contador; 10: Osciloscópio, 11: Computador Pessoal com placa de velocimetria e módulo ADCM)

### 3.2 Instalação Experimental

A fluorescência das soluções de rodamina B foi estudada numa caixa de vidro (5 mm de espessura) com 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 205 mm de altura. A caixa de vidro, contendo uma solução aquosa de rodamina B com concentração conhecida, foi colocada sobre um agitador electromagnético (Framo, modelo M22/1), para assegurar a uniformidade da concentração das soluções e evitar a ocorrência de saturação no volume de controlo.

As medições simultâneas de velocidade e concentração foram efectuadas no interior de um tubo de vidro acrílico de eixo horizontal, com 2 m de comprimento, 42 mm de diâmetro interno e 4 mm de espessura. O acesso óptico era efectuado através duma caixa óptica, cheia de água para reduzir os efeitos de refacção.

O escoamento com uma concentração uniforme e conhecida de rodamina B foi obtido através da injeção de um caudal conhecido de solução-base no escoamento alimentado através de uma bomba centrífuga a partir de um reservatório de água limpa no subsolo. A

instalação funcionava em circuito aberto e tinha capacidade para caudais até 1480 L/h, medidos por um rotâmetro (Brooks R\_10M\_25\_3), com uma resolução igual a 2 % (29.6 L/h) da escala máxima.

A solução-base de rodamina B era injectada por uma bomba doseadora electrónica de diafragma (Cole Parmer G74110-15), a operar com a frequência máxima de pulsação do diafragma (125 pulsos por minuto) e o máximo de amplitude dessas pulsações. A solução-base, solução concentrada de rodamina B, encontrava-se isolada da luz ambiente num reservatório de nível constante com capacidade para 30 L, onde era constantemente agitada. A injeção era efectuada a mais do que 196 diâmetros da conduta a montante da secção de teste, garantindo a concentração homogénea das soluções na secção de teste. O caudal injectado, determinado por calibração volumétrica para diferentes caudais de água no circuito principal era constante e igual a 2.52 L/h com uma incerteza igual a 2 % (0.05 L/h) do caudal máximo.

### 3.3 Traçador fluorescente

As substâncias fluorescentes mais utilizadas como traçadores são compostos orgânicos com elevada solubilidade e espectros de absorção em gamas de comprimentos de onda entre 400 e 600 nm, típicos de lasers comuns em laboratórios de Mecânica dos Fluidos. São usualmente utilizadas a fluorescina (e.g., Koochesfahani (1984) e Walker (1987), cujo máximo do espectro de absorção ocorre para 490 nm e possibilita a indução de fluorescência através de lasers a emitir na luz azul (488 nm); a rodamina B (e.g., Arcoumanis (1990) e Lemoine (1996)) e a rodamina 6G (e.g., Papantoniou (1986) e Gaskey (1990)), cujos máximos dos espectros de absorção ocorrem para 550 e 530 nm, possibilitando a indução de fluorescência através de lasers a emitir na luz verde (514.5 nm). Além disto, estas substâncias apresentam ainda boa solubilidade em água, toxicidade baixa, eficiência quântica elevada e pequena dependência de factores ambientais (Lakowicz, 1983).

Utilizou-se a rodamina B ( $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ ) porque, ao contrário de outras tintas fluorescentes, as características fluorescentes da rodamina B não se alteram ao longo de um período de várias horas se a sua solução aquosa for continuamente agitada (Arcoumanis, 1990). Além disso, este traçador é especialmente indicado para estudos de mistura turbulenta devido à sua baixa difusividade molecular de cerca de  $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  e correspondente número de Schmidt da ordem de  $10^3$ . Relativamente à sua adequação ao equipamento disponível, a rodamina B reage à luz laser de comprimento de onda igual a 514.5 nm, luz verde típica de um laser de Argon-ion, e emite luz de comprimento de onda igual a 590 nm, luz laranja, na gama de funcionamento de fotodetectores em LDA.

A análise do sinal de concentração foi efectuada em termos da voltagem correspondente à intensidade de luz fluorescente medida ( $I_r$ ), quantificada pelas equações (Lima, 2000),

$$\overline{I_r} = \overline{I_A} - \overline{I_{zl}} \quad (2)$$

$$\overline{i_r^2} = \overline{i_A^2} - \overline{i_{zl}^2} \quad (3)$$

para os seus valores médio e flutuação, respectivamente.  $I_A$  representa a resposta do fotomultiplicador ao sinal de fluorescência emitido a partir do volume de controlo e  $I_{zl}$  representa a intensidade de luz medida pelo fotomultiplicador sem a presença de traçador fluorescente no volume de controlo, e que era determinada no início de cada série de medições. Para mais pormenores relativos à análise do sinal de fluorescência ver Lima (2000, 2002a).

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Influência da potência laser e da concentração

As medições apresentadas nesta subsecção foram efectuadas no interior da caixa de vidro, em soluções com valores crescentes de concentração de rodamina B, obtidas a partir de uma solução inicial de água limpa à qual se adicionavam volumes conhecidos de solução-base até à maior concentração pretendida. Esta metodologia de preparação das soluções permitia minimizar a incerteza experimental associada (Lima, 2000). Cada medição corresponde ao valor médio de 5000 valores, adquiridos a uma frequência de 1000 Hz, subtraído do valor médio do nível zero (equação 2).

Para o conjunto das potências laser utilizadas a relação entre a concentração de rodamina B e a intensidade do sinal de fluorescência (figura 3) desvia-se da relação linear esperada (equação 1) para concentrações superiores a 0.08 mg/L. Para a mesma potência, este desvio acentua-se com o aumento da concentração. Com o aumento da potência o desvio é superior e ocorre a partir de menores valores de concentração. Desta forma, para o equipamento de medida e configuração experimental utilizados, optou-se por usar concentrações até 0.08 mg/L e potências laser inferiores a 800 mW.

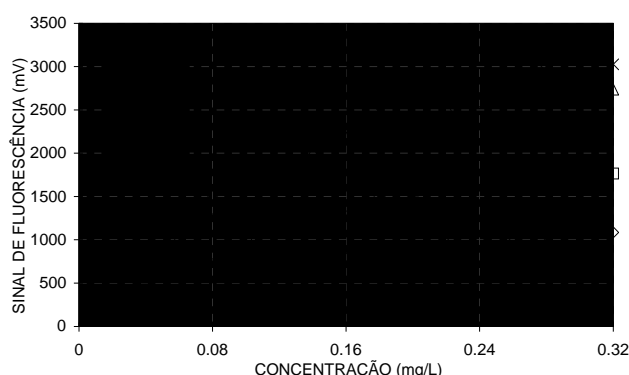


Fig. 3. Sinal de fluorescência função da concentração de rodamina B

### 4.2 Calibração do traçador fluorescente

As medições desta subsecção e seguintes foram efectuadas no interior do tubo de vidro acrílico, tendo-se avaliado a relação entre a concentração e o sinal fluorescente para concentrações inferiores a 0.12 mg/L. Cada medição corresponde ao valor médio de 1000 valores, adquiridos sempre que o sistema de aquisição de dados possuía um sinal de velocidade válido, subtraído do valor médio do nível zero (equação 2).

Efectuaram-se medições para 3 valores de potência: 200, 400 e 600 mW, sendo a potência máxima da luz laser incidente limitada a 600 mW, porque potências superiores danificavam a superfície da caixa óptica. O volume de controlo foi colocado no centro da secção de teste, com os raios contidos no plano de simetria horizontal da secção e correspondente extensão do percurso óptico na solução homogénea de rodamina B, escoada no interior do tubo acrílico, igual a 21 mm.

Para concentrações inferiores a 0.08 mg/L não se verificaram fenómenos de saturação no volume de controlo e confirmou-se a existência duma relação linear entre sinal de fluorescência e concentração, que podia ser considerada independente da potência. A

regressão linear entre a voltagem média  $\bar{F}$  e os valores C da concentração de rodamina B da solução e P da potência de luz laser incidente, assim encontrada é dada por,

$$\bar{F} = 16.983CP \quad (4)$$

obtida com um coeficiente de regressão linear  $r^2 \approx 0.99$ , e está representada na figura 4. Como para potências inferiores a 600 mW não se verificavam fenômenos de fotodecomposição e a relação linear existia para as 3 potências utilizadas, deve utilizar-se a potência máxima (600 mW), para maximizar o sinal de fluorescência e aumentar a sensibilidade do sistema de medição por LIF.

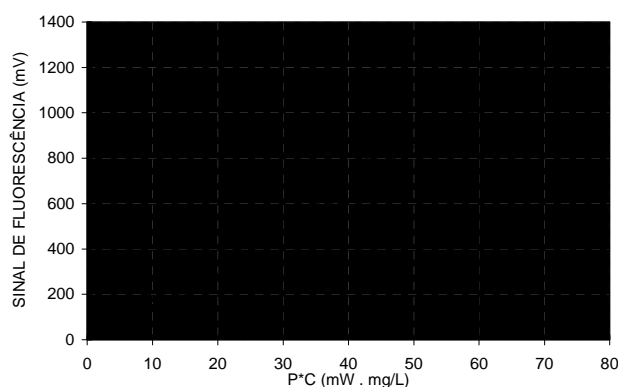


Fig. 4. Relação entre a voltagem do sinal de fluorescência e o valor do produto potência-concentração de rodamina B

#### 4.3 Medição simultânea de velocidade e concentração

Foram analisadas soluções com concentração de rodamina B inferior a 0.12 mg/L, para estabelecer a capacidade de medir velocidade e concentração (tabela 1). A figura 5 mostra perfis de velocidade axial média ( $\bar{U}$ ) e de concentração média, medidos em simultâneo ao longo de metade do diâmetro do tubo de vidro acrílico. A extensão máxima do percurso óptico foi de 21 mm, igual à dimensão do raio da secção de teste, razão pela qual se observa o efeito da parede para  $x = 0$  e no eixo da conduta em  $x = 21$  mm não existe qualquer diminuição.

Tabela 1. Concentrações, caudais, números de Reynolds e velocidades médias do escoamento no interior do tubo de vidro acrílico

C [mg/L]	Q [L/h]	Re	U [m/s]
0.02	1216.1	10139	0.24
0.04	609.3	5080	0.12
0.06	406.6	3390	0.08
0.08	304.4	2538	0.06
0.10	243.8	2032	0.05
0.12	202.3	1687	0.04

Nas medições de velocidade, verificou-se uma intensidade de turbulência axial ( $u'/U$ ) aproximadamente constante ao longo do perfil, e igual a 14 % para todos os caudais utilizados. As velocidades médias no interior do tubo acrílico variavam entre 0.04 e 0.24 m/s (tabela 1).

Os meios-perfis de velocidade média da figura 5, em conjunto com os meios-perfis de concentração, são uma indicação da possibilidade de obter valores simultâneos de velocidade



e concentração num mesmo ponto do escoamento. Ao contrário do que acontece com a medição de concentração, não foi possível medir velocidade a distâncias da parede inferiores a 4 mm.

Os valores de flutuação de concentração calculados através da equação 2 apresentavam valores inferiores a 1.2, 3.8 e 7.7 mV respectivamente para potências de 200, 400 e 600 mW. Estes são valores próximos de 1 % da voltagem média do sinal correspondente, e como a concentração é uniforme no interior de toda a secção de teste, foram considerados como uma incerteza experimental associada à medição de concentração através de LIF (Lima, 2000).

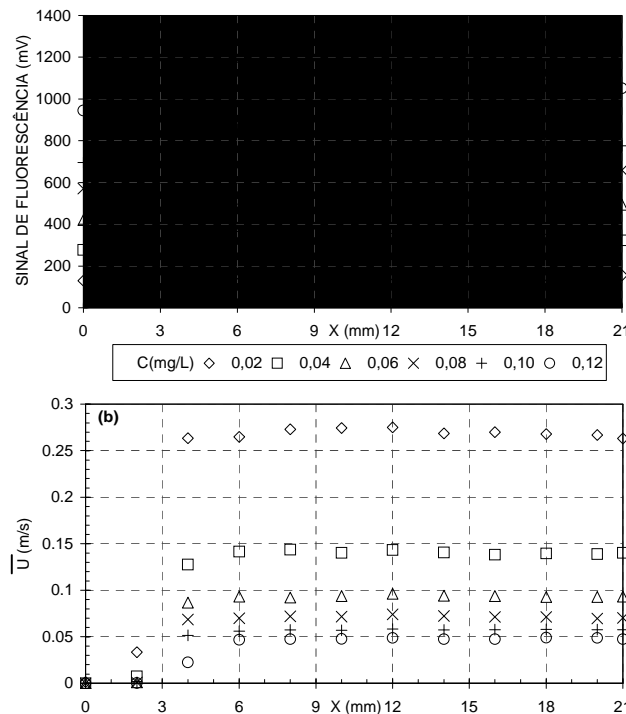


Fig. 5. Concentração (a) e velocidade média (b), em função da distância, para diferentes concentrações de rodamina B e 600 mW de potência laser

#### 4.4 Influência do percurso óptico

A figura 5 mostra ainda a existência de absorção ao longo do percurso óptico dentro da secção. Esta diminuição do sinal médio de fluorescência pode ser quantificada através do quociente entre a resposta real do fotomultiplicador e a sua resposta no caso de não existir absorção ( $\tau_{mf}$ ), calculado entre  $x=2$  mm e o eixo do escoamento ( $x=21$  mm). A absorção constitui um ruído óptico de atenuação e, se definida por  $1-\tau_{mf}$ , pode ser desprezada para concentrações que conduzam a valores  $1-\tau_{mf} \ll 1$  (Becker, 1977).

O sistema óptico era utilizado na configuração de retrodispersão, o que se traduzia num sinal de velocidade de pior qualidade, e a utilização da potência máxima era aconselhável. Para a potência de 600 mW, que correspondia a um sinal de velocidade de melhor qualidade, e concentrações superiores a 0.04 mg/L o sinal diminuiu entre 6.6 e 10.3 % ao longo do percurso óptico entre  $x=2$  e 21 mm. A absorção cifra-se em valores próximos de 2.9 % por centímetro de extensão de percurso óptico para concentrações de 0.02 mg/L e de 0.04 mg/L. Estes valores são ligeiramente superiores aos obtidos em medições análogas no interior da caixa de vidro (Lima, 2000), facto que foi atribuído à influência da geometria na

captação da luz fluorescente pela óptica de recolha de luz. Apesar disso os resultados verificam a condição  $1 - \tau_{mf} \ll 1$  para pequenas extensões do percurso óptico.

Pretendendo utilizar a potência laser máxima (600 mW), considerou-se que uma solução com concentração de rodamina B igual a 0.04 mg/L, permitia analisar um escoamento de misturas não homogêneas no interior do tubo de vidro acrílico (Lima 1996, 2000). Estes resultados permitem desprezar o efeito da absorção de luz ao longo do campo óptico nos resultados de concentração, evitando a introdução de correcções nos resultados ao contrário da prática em por exemplo Koochesfahani (1985), facilitando assim a utilização simultânea da LDA e LIF para o estudo da mistura turbulenta (Lima, 2002b). Além disto, este valor de absorção para uma solução com concentração igual a 0.04 mg/L analisada recorrendo a 600 mW, foi suficientemente baixo para que se considerasse desprezável a influência do traçador fluorescente nas características do sinal de velocidade. Nestas condições, o sistema de medição de concentração através de LIF tinha capacidade para determinar concentrações entre  $1.5 \times 10^{-4}$  e 0.04 mg/L.

## 5. CONCLUSÕES

Este artigo reúne um conjunto de ensaios numa caixa de vidro e num tubo de vidro acrílico, e descreve os procedimentos para medição de velocidade e concentração em escoamentos aquosos, através de LDA e LIF.

Verificou-se que a relação linear entre concentração de rodamina B e a intensidade de fluorescência ocorre para concentrações até 0.08 mg/L, no caso de potências laser inferiores a 800 mW. Para concentrações inferiores a 0.08 mg/L não se verificavam fenómenos de saturação e para potências inferiores a 600 mW não se verificavam fenómenos de fotodecomposição.

Obtiveram-se perfis de velocidade média típicos de um escoamento no interior de um tubo. Os perfis de concentração média correspondentes permitiram concluir que a absorção ao longo do percurso óptico é independente da potência laser incidente. Optando pela potência laser máxima (600 mW) como forma de melhorar a relação sinal/ruído e para minimizar a absorção ao longo do percurso óptico, a concentração máxima a utilizar deverá ser igual a 0.04 mg/L se se pretender utilizar LDA e LIF numa geometria cilíndrica. Neste caso o sistema de medição de concentração através de LIF tinha capacidade para determinar concentrações entre  $1.5 \times 10^{-4}$  e 0.04 mg/L.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as condições que foram postos à disposição no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da FEUP. Agradecem a ajuda do técnico Jerónimo Sousa, e o interesse da Professora Fernanda Proença por este trabalho.

Este estudo realizou-se no âmbito dos projectos PEAM/C/APR/132/91, intitulado *Dispersion Studies in Liquid Flows by Laser Induced Fluorescence*, e Bulet (POCTI 33980/99). M.M.C.L. Lima beneficiou das Bolsas BD/2033/92/RN/CIÊNCIA e BD/5623/95/PRAXIS XXI.

## REFERÊNCIAS

Arcoumanis, C., McGuirk, J.J. e Palma, J.M.L.M., “On the use of fluorescent dyes for concentration measurements in water flows”, *Experiments in Fluids*, 10, 177-180 (1990).

- Becker, H.A., "Mixing, concentration fluctuations, and marker nephelometry", in Launder, B.E., editor, *Studies in Convection*, volume 2, 45-139. Academic Press (1977).
- Durst, F., Melling, A. e Whitelaw, J.H., "Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry", Academic Press, Londres, (1981).
- Gaskey, S, Vacus, P., David, R. e Villiermaux, J., "A method for the study of turbulent mixing using fluorescence spectroscopy", *Experiments in Fluids*, 29, 137-147 (1990).
- Guilbault, G.G., "Practical Fluorescence", 2ª Edição. Marcel Dekker, Inc. (1990).
- Koochesfahani, M.M., "Experiments on Turbulent Mixing and Chemical Reactions in a Liquid Shear Layer", Tese de Doutorado, California Institute of Technology, USA (1984).
- Koochesfahani, M.M. e Dimotakis, P.E. "Laser-induced fluorescence measurements of mixed fluid concentration in a liquid plane shear layer", *AIAA Journal*, 23(11), 1700-1707 (1985).
- Lakowicz, J.R., "Principles of Fluorescence Spectroscopy", Plenum Press, New York (1983).
- Lemoine, F, Wolff, M e Lebouche, M., "Simultaneous concentration and velocity measurements using combined laser-induced fluorescence and laser doppler velocimetry: Application to turbulent transport", *Experiments in Fluids*, 20, 319-327 (1996).
- Lima, M.M.C.L., Palma, J.M.L.M. e Silva, N.A., "Simultaneous Velocity and Concentration Measurements in Confined Coaxial Jets". *Proceedings do 8th International. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 8-11 Julho, Lisboa, Portugal, Artigo 30.4. (1996).
- Lima, M.M.C.L., "Medição Simultânea de Velocidade e Concentração através de Anemometria Laser Doppler e Fluorescência Induzida por Laser", Tese de Doutorado, University do Porto, Portugal (2000).
- Lima, M.M.C.L., Palma, J.M.L.M. e Areal, P.M., "Scalar Measurements by Laser Induced Fluorescence". *Proceedings do 11th International. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 8-11 Julho, Lisboa, Portugal, Artigo N. 27.5. (2002a).
- Lima, M.M.C.L. e Palma, J.M.L.M., "Mixing in coaxial confined jets of large velocity ratio". *Proceedings do 11th International. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 8-11 July, Julho, Portugal, Artigo N. 36.1. (2002b).
- List, E.J., "Environmental Fluid Mechanics", em Lumley, J.L., Acrivos, A., Leal, L.G. and Leibovich, S., editores, *Research Trends in Fluid Dynamics (Report from the United States National Committee on Theoretical and Applied Mechanics)*, 148-166, Academic Press (1996).
- Owen, F.K., "Simultaneous laser measurements of instantaneous velocity and concentration in turbulent mixing flows", AGARD N.193, *Applications of Non-Intrusive Instrumentation in Fluid Flow Research* (1976).
- Papantoniou, D.A., "Observations in Turbulent Buoyant Jets by use of Laser Induced Fluorescence", Tese de Doutorado, California Institute of Technology, USA (1986).
- Walker, D.A., "A fluorescence technique for measurements of concentration in mixing liquids", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 20, 217-224 (1987).
- Wild, G., André, J.-C., Grandclaude, M, Midoux, N. e Charpentier, J.-C., "Méthodes et instrumentation photophysiques pour le genie des procédés", *Entropie*, 137/138, 69-85 (1987).

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.